

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTICKÝ VLÁKNOVÝ PŘENOSOVÝ SYSTÉM

FIBER OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Horský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Dejdar

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Tomáš Horský

ID: 189015

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Optický vláknový přenosový systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je vytvoření laboratorní úlohy, která bude simulovat reálnou optickou přenosovou trasu. Po sestavení trasy bude nutné vytvořit grafické uživatelské rozhraní (GUI), za pomoci kterého bude možné měnit parametry přenosového systému, což zahrnuje i možnost změn jednotlivých parametrů dílčích komponent. GUI by mělo být naprogramováno v prostředí LabVIEW. Dále bude napsán návod pro tuto laboratorní úlohu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika: Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] Learn LabVIEW: intro to graphical programming.: Online kurz. [online]. Dostupné z: <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/>

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje zpracování programu pro simulaci disperze v optické přenosové trase. Práce seznamuje s parametry přenosu optickým vláknem, jako útlum, rozptyl, disperze a šířka pásma. Podrobněji je rozepsána disperze, která je stěžejním parametrem této práce. V práci je také zahrnuta charakteristika měření pomocí diagramu oka a jeho analýza. Výsledná práce může kromě simulace disperze sloužit jako měřicí zařízení pro reálné přenosové trasy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Diagram oka, disperze, fotodetektor, LabView, laser, optické vlákno, Red Pitaya, šířka pásma

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the program processing for the simulation of dispersion on the optical transmission. Parameters of optical fiber, such as attenuation, diffusion, dispersion, and bandwidth are described in the theoretical part. The main focus is on dispersion while being the key parameter of this work. In the practical part, the measurement characteristics of the eye diagram and its analysis are discussed. Simulator of dispersion can serve both for simulation as well as a measuring device for real transmission routes.

KEYWORDS

Bandwidth, dispersion, eye diagram, LabView, laser, optic fibre, photodetector, Red Pitaya

HORSKÝ, Tomáš. *Optický vláknový přenosový systém*. Brno, Rok, 51 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Optický vláknový přenosový systém“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Dejdarovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Optický přenosový systém	12
1.1 Kabelový přenosový systém	12
1.1.1 Optický vysílač	12
1.1.2 Optický přijímač	13
1.1.3 Optická trasa a prvky	13
1.2 Optická vlákna	14
1.2.1 Jednovidové vlákno	14
1.2.2 Mnohovidové vlákno se skokovým indexem lomu	15
1.2.3 Mnohovidové vlákno s gradientním indexem lomu	15
1.3 Bez kabelový přenosový systém	16
2 Parametry optických vláken	18
2.1 Totální odraz, numerická apertura	18
2.2 Útlum	19
2.2.1 Absorpce	20
2.2.2 Rozptyl	20
2.2.3 Ztráty ohybem vlákna	21
2.3 Disperze	22
2.3.1 Vidová disperze	22
2.3.2 Chromatická disperze	23
2.3.3 Polarizační vidová disperze	24
2.4 Šířka pásma	24
2.5 Diagram oka	25
2.5.1 Vznik a analýza diagramu oka	25
2.5.2 Q-faktor, BER	28
3 Optická trasa	30
3.1 LabVIEW	30
3.1.1 Grafické vývojové prostředí	30
3.2 Red Pitaya	32
3.2.1 Práce s LabView	33
3.3 Simulovaná optická trasa	34
4 Simulační program	36
4.1 Popis simulace	36
4.1.1 Sestavení spojení	36

4.1.2 Simulace disperze	38
5 Laboratorní úloha	41
6 Závěr	46
Literatura	47
Seznam příloh	49
A Přední panel	50
B Obsah přiloženého CD	51

Seznam obrázků

1.1	Zapojení optického spoje [4].	13
1.2	Vlákno jednovidové [1].	15
1.3	Vlákno mnohovidové se skokovým indexem lomu [1].	15
1.4	Vlákno mnohovidové s gradientním indexem lomu [1].	16
1.5	Stacionární spoj v atmosféře [6].	17
2.1	Znázornění totálního odrazu [3].	18
2.2	Navázání světelného paprsku do optického vlákna [3].	19
2.3	Parametry optických vláken [5].	21
2.4	Vznik disperze v mnohovidovém vláknu [1].	22
2.5	Vliv chromatické disperze na signál v optickém vlákne [4].	23
2.6	Vliv polarizační vidové disperze [4].	24
2.7	Zkreslení signálu při přenosu [7].	25
2.8	Ideální signál a diagram oka [7].	26
2.9	Reálný signál a diagram oka [7].	26
2.10	Diagram oka a jeho analýza [8].	27
2.11	Souvislost Q-faktoru a bitové chybovosti kanálu [9].	28
3.1	Přední panel, paleta ovládacích prvků, ovládací prvky a indikátory.	31
3.2	Blokové schéma s paletou funkcí a propojenými terminály.	32
3.3	STEMlab platforma [11].	33
3.4	Grafické uživatelské rozhraní Red Pitaya.	33
3.5	Funkce Red Pitaya v LabView.	34
3.6	Laser a fotodetektor Koheron [12].	35
4.1	Konfigurace signálu bloky Red Pitaya.	36
4.2	Generace dat z řetězce.	37
4.3	Generace dat z binárního kódu.	38
4.4	Derivace signálu a zjištění hran.	38
4.5	Podmínky pro simulaci disperze.	39
4.6	Vybrání každého x-tého prvku z pole.	39
4.7	Diagram oka v programu.	40
5.1	Celková disperze u jednovidových vláken [1].	42
5.2	Diagram oka a jeho analýza [2].	43
5.3	Nastavení generace dat v GUI.	44
5.4	Nastavení parametrů pro simulaci disperze v GUI.	44

Seznam tabulek

2.1	Definice, které se dají vyčíst z diagramu oka	27
3.1	Parametry laseru LD101 a fotodetektoru PD100 [12].	35
5.1	Definice, které se dají vyčíst z diagramu oka	43

Úvod

Téma bakalářské práce se zabývá tvorbou simulačního programu za účelem simulace disperze v optické přenosové trase. Optická vlákna postupně nahrazují metalické kabely, a dále se vyvíjejí. Pro správnou implementaci je nutné znát limity optického vlákna, aby probíhala komunikace bez problémů.

Cílem této práce je propojení optické trasy s měřicí platformou Red Pitaya a vytvoření simulačního programu v grafickém návrhovém programu LabView. Pro úspěšnou realizaci stanoveného cíle je nutné pochopit parametry optického vlákna a jejich dopad na přenos.

První kapitola je věnována popisu optické přenosové trasy a optickým vláknům. V rámci této kapitoly jsou popsány prvky optické trasy a podrobněji druhy optických vláken.

Druhá kapitola je zaměřena na parametry a charakteristiky optických vláken. Podrobněji je rozebrán a rozdělen do více skupin parametr disperze, která je stěžejní parametr této práce. V druhé části je také podrobněji popsán diagram oka a jeho vlastnosti.

Třetí kapitola popisuje použitý hardware a software pro generování signálu, jeho příjem a následnou úpravu. Jsou zde popsány základní parametry přenosové trasy, měřícího zařízení a základy práce s návrhovým programem.

Čtvrtá kapitola popisuje vlastní vytvořený simulační program, který simuluje změnu disperze v optické trase se změnou délky trasy a změnou šířky pásma.

Poslední část je věnována vytvořené laboratorní úloze pro měření disperze a analýzu diagramu oka.

1 Optický přenosový systém

Hlavní vývoj optických přenosových systémů a médií začal v 70. letech 20. století, a nyní se již optické systémy používají především na dálkových trasách, ale i v místních sítích. Nosičem informace v optických systémech je záření, jehož oblast sahá od 100 nm do 1 mm a rozděluje se na sedm podoblastí:

- 3 ultrafialové (100 nm – 280 nm; 280 nm – 315 nm; 315 nm – 380 nm),
- oblast světelná (380 nm – 780 nm),
- 3 infračervené (780 nm – 1,4 μm; 1,4 μm – 3 μm; 3 μm – 1 mm).

Přenos informace v optických systémech se může provádět dvěma způsoby - přenos optickými vlákny nebo pomocí atmosférických spojů.

1.1 Kabelový přenosový systém

Přenos informace optickým vláknem se oproti metalickému provedení, které zcela závisí na elektrických signálech procházející kabelem, provádí ve formě vysílání světelného paprsku z jednoho místa na druhé. Při přenosu světelným paprskem nevznikají elektrická ani magnetická pole, které bývají problémem v metalických kabelech a mohou způsobovat parazitní vazby. Optický spoj je odolný proti odposlouchávání, rušivým signálům a spojení je dokonale jednosměrné, tudíž nedochází ke zpětnému ovlivňování z výstupu na vstup [1] [2] .

1.1.1 Optický vysílač

Slouží k transformaci elektrického signálu na optický s nejnižšími možnými ztrátami. Využívá modulaci záření v optickém modulátoru nebo změnu budícího proudu v případech polovodičových zdrojů. Jako optické zdroje se používají elektroluminiscenční (LED) a laserové diody.

Dioda LED je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N. Elektrický proud, který prochází přechodem P-N v propustném směru emituje světelné záření o určité vlnové délce. Při zmenšující se vlnové délce emitovaného světelného záření roste prahové napětí, při kterém začíná diodou procházet proud v propustném směru, hodnoty se pohybují od 1,6 V do 3 V. Tyto diody mají velkou životnost a malou provozní teplotu, ale nevýhodou je malá svítivost.

Laserová dioda vyzařuje světlo ve formě úzkého svazku, na rozdíl od LED diody je koherentní, což znamená, že fotony se ve svazku pohybují jedním směrem a jsou stejnoměrně rozděleny. Laserový paprsek je monochromatický (jedna vlnová délka). Vznik světelné emise vzniká v tenké přechodové hranici mezi polovodiči typu P a N,

kdy nadbytečnou energii vyzáří v podobě světla a tepla. Mezi výhody patří vysoký emitovaný výkon, vysoká přenosová rychlost a malá šířka spektra [3].

1.1.2 Optický přijímač

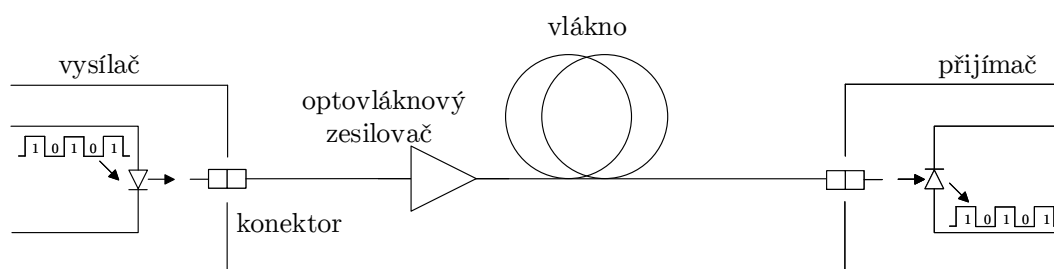
Podobně jako optický vysílač slouží k transformaci optického signálu na elektrický. Základním prvkem přijímačů jsou fotodiody, které signál převádí. Fotodiody se používají kvůli linearitě, nízkému šumu a větší citlivosti k delším vlnovým délkám. Využívá fotoelektrický jev k přeměně světelné energie na elektrickou. Z dopadajících fotonů na polovodičový přechod se dopadem uvolňují dvojice elektron-díra, které proudí přechodem, tudíž vzniká fotoelektrické napětí. Využívají se PIN nebo lavinové diody [3].

1.1.3 Optická trasa a prvky

K přenosu informací se výhradně využívá optické vlákno, ale rovněž mezi vysílačem a přijímačem se může nacházet atmosféra, vakuum nebo kosmický prostor. Vlákna se vybírají podle určení přenosové sítě, jednovidová, mnohavidová se skokovým indexem lomu nebo mnohavidová s gradientním indexem lomu. Optické trasy obsahují další prvky, které napomáhají k správnému přenosu informací [3]. Využívají se:

- optické konektory,
- spojky,
- multiplexy a demultiplexy,
- pigtaily,
- zesilovače.

Zapojení optické přenosové trasy lze vidět na Obr.1.1, kde jsou použity i některé z pomocných prvků.



Obr. 1.1: Zapojení optického spoje [4].

1.2 Optická vlákna

Základní struktura optických vláken se skládá z jádra, pláště, primární a sekundární ochrany, popřípadě dalších opatření. Základním materiálem pro výrobu optických vláken je SiO_2 (oxid křemičitý) a příměsi jako GeO_2 (oxid germaničitý), P_2O_5 (oxid fosforečný) nebo B_2O_3 (oxid boritý). Velikosti struktury vlákna:

- jádro - 9, 50, 62,5 μm ,
- plášť - 125 μm ,
- primární ochrana - 250 μm (400, 500, 700, 900 μm),
- sekundární ochrana - 0,9 - 2 mm.

Přenosové vlastnosti jsou závislé na použité technologii optických vláken. Vlákná se dělí na jednovidové, mnohavidové s konstantním indexem lomu a na gradientní s proměnným indexem lomu. Taktéž jsou závislé na parametrech daných vláken. Základními parametry optických vláken jsou:

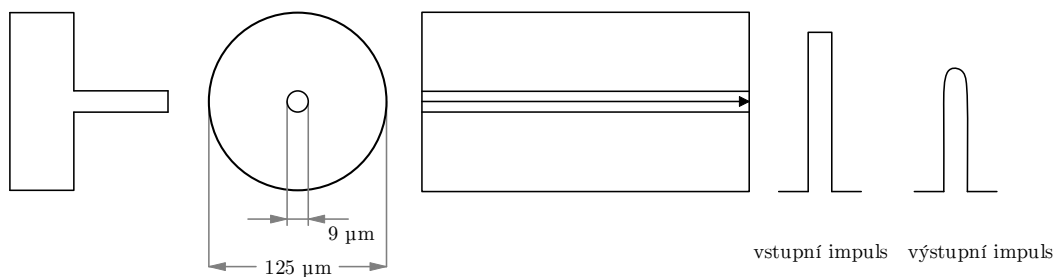
- útlum [dB],
- disperze [$\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$],
- šířka pásma [MHz].

Dalšími parametry a pojmy optických vláken jsou rozptyly vláken a ztráty ohybu, které souvisí s útlumem optického vlákna. Totální odraz, index lomu a numerická apertura, které popisují a definují chování se světla ve vláknu. Poslední skupinou jsou parametry, které jsou závislé na nedokonalosti vlákna: ztráty makroohyby, vazební ztráty a zbytková vlhkost.

1.2.1 Jednovidové vlákno

Tato konstrukce optického vlákna se používá především v delších trasách s velkou přenosovou kapacitou. Vede jediný vid (jeden světelný paprsek) bez odrazů i ohybů, jak je vidět na Obr.1.2. Tato vlákna vykazují menší disperzi, tudíž mají větší přenosovou šířku pásma. Pro buzení se využívají lasery. Průměr jádra se pohybuje okolo 7 - 9 μm , nejčastěji se používá průměr 9 μm , průměr pláště obvykle 125 μm .

Charakteristiky vlákna: disperze 18 ps/km, útlum 0.2 dB/km při vlnové délce 1,55 μm , přenosová rychlost 10 Gbit.

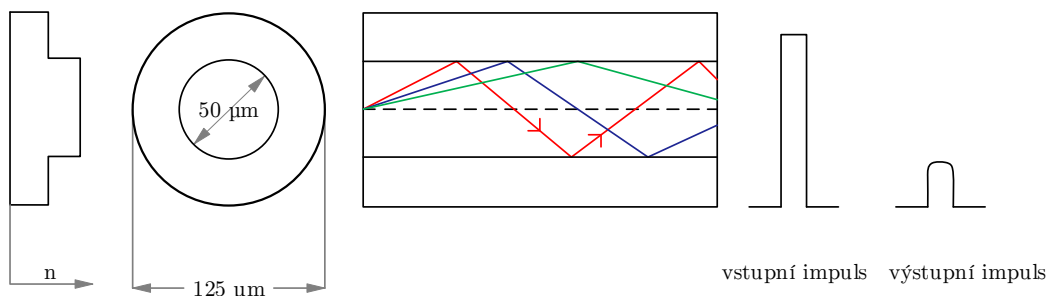


Obr. 1.2: Vláknno jednovidové [1].

1.2.2 Mnohovidové vlákno se skokovým indexem lomu

Světelný paprsek se u mnohovidových vláken se skokovým indexem lomu šíří pomocí úplného (totálního) odrazu na rozhraní jádro/plášť. Průměr jádra se pohybuje v rozmezí 50 - 200 μm , tudíž jádro může vést několik vidů, viz Obr.1.3. Využívá se nejvíce na krátké vzdálenosti, především pro krátké přenosy dat, lokální sítě nebo automatizační účely.

Charakteristiky vlákna: disperze 50 ns/km, útlum 5 – 20 dB/km, přenosová rychlost 60 Mbit.



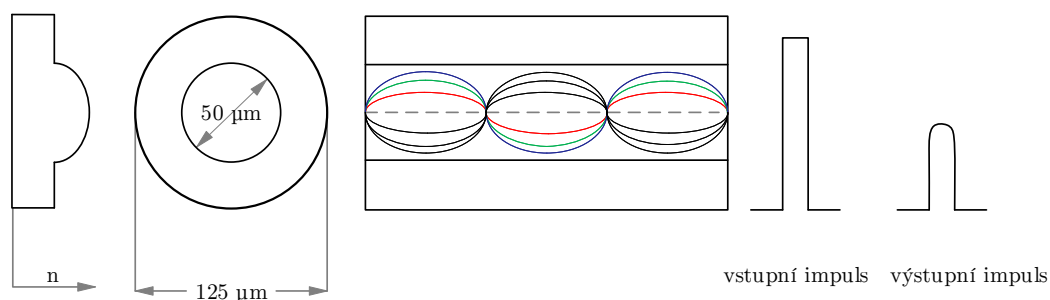
Obr. 1.3: Vláknno mnohovidové se skokovým indexem lomu [1].

1.2.3 Mnohovidové vlákno s gradientním indexem lomu

Šíření informace, oproti vláknům se skokovým indexem lomu, se nemění pomocí skoku ale plynule. Používá speciální úpravu indexu lomu, díky kterému vlákno dané vidy ohýbá většinou s průběhem kvadratické paraboly. Vidy, které se pohybují po delší dráze se dostávají do oblasti s menší hustotou a jejich rychlost je větší. Vidy šířící se kratší dráhou, se nacházejí v hustějším prostředí, tudíž jejich rychlost je menší. Při správné volbě indexu lomu v jádře, lze dosáhnout toho, že dané vidy se budou

neustále potkávat a jejich čas šíření tudíž bude stejný, viz Obr. 1.4. Toto vlákno má lepší charakteristiky než vlákno se skokovým indexem lomu, ale jeho výroba je dražší a složitější. Gradientní vlákna jsou vhodná především pro telekomunikační účely, pro spoje na kratší vzdálenosti [2].

Charakteristiky vlákna: disperze při $0,85\ \mu\text{m}$ $1\ \text{ns/km}$, útlum $2,5 - 8\ \text{dB/km}$, přenosová rychlost $600\ \text{Mbit}$.



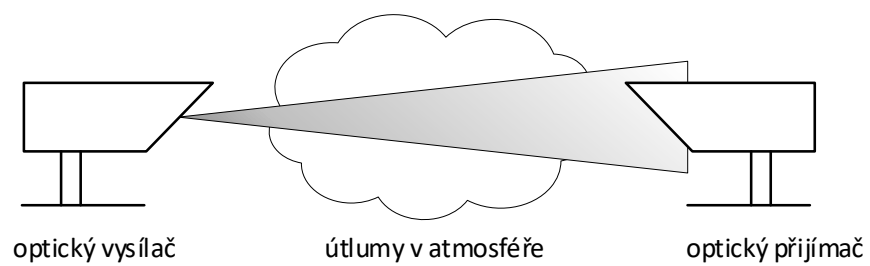
Obr. 1.4: Vlákno mnohovidové s gradientním indexem lomu [1].

1.3 Bez kabelový přenosový systém

Prvním patentovaným optickým bezkabelovým spojem (OBS) byl v roce 1880 photophone. Zařízení využívalo systém zrcadel, z nichž jedno mělo funkci modulátoru, jehož vychylováním lidským hlasem měnil optickou intenzitu. Tato technologie však neměla potřebnou kvalitu, tudíž se neprosadila a větší pokrok v OBS zaznamenali až laserové technologie s fotodiodami. OBS lze rozdělit na **stacionární spoje** a mobilní optické spoje pracující v naší atmosféře, a **satelitní spoje**, které se používají v blízkém nebo vzdáleném kosmu.

Stacionární spoje

Tyto spoje využívají k přenosu informací laserovou nebo LED diodu. Příjímací část OBS využívá PIN nebo APD (lavinové) diody, které slouží k přeměně optického signálu na elektrický. Spoj se skládá ze dvou hlavic, které pracují v plně duplexním provozu, Obr. 1.5. Komunikuje se pomocí úzkého optického svazku. Mezi hlavicemi musí být přímá viditelnost, nevýhodou bývají někdy značné útlumy v atmosféře, díky kterým se tato technologie v dnešní době využívá hlavně ve vojenském a vesmírném odvětví [6].



Obr. 1.5: Stacionární spoj v atmosféře [6].

2 Parametry optických vláken

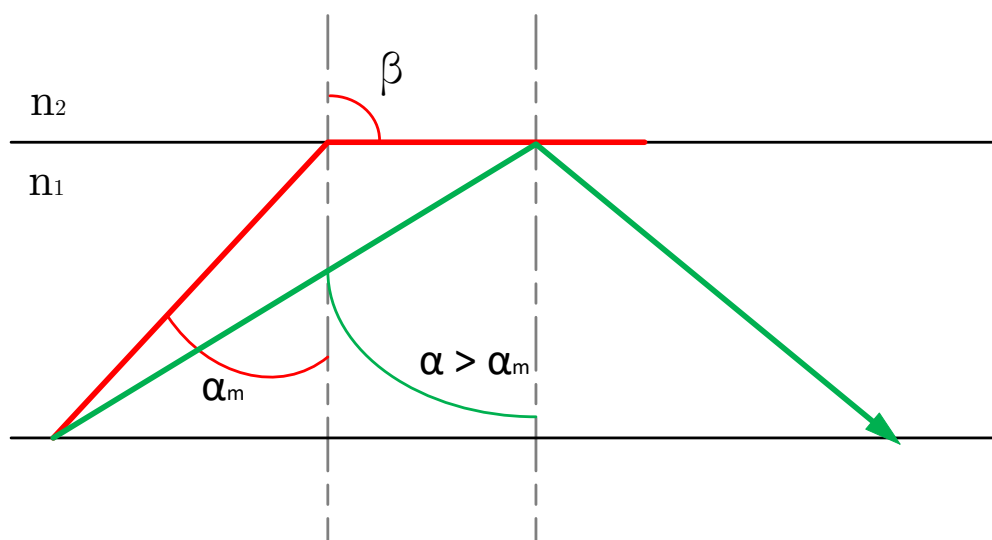
Optická vlákna nejsou dokonalá, tudíž se zde podobně jako u metalického vedení, měří a určuje mnoho parametrů, které vlákna definují. Jedná se o pojmy index lomu, totální odraz, numerická apertura, které definují hodnoty a úhly, které jsou potřeba pro vedení vidů ve vláknu. Parametry útlum a disperze, které definují změny ve vedení vidů na trase. Dalšími parametry a pojmy, které se často využívají jsou: šířka pásma, zbytková vlhkost nebo parametr MFD (Mode Field Diameter), který se měří u jednovidových vláken.

2.1 Totální odraz, numerická apertura

Přenos informací optickým vláknem je založeno na totálním odrazu dvou rozdílných prostředí s rozdílnými indexy lomu. **Index lomu** určuje poměr rychlosti světla v , na rozhraní dvou prostředí. Je to bezrozměrná veličina obvykle značená písmenem n ,

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.1)$$

v případě optických vláken jde o jádro - n_1 a plášť - n_2 . Platí, že $n_1 > n_2$. Při přechodu světla z hustšího prostředí do řidšího dochází k lámání světla od kolmice a při určitém úhlu dopadu dosáhne hodnoty, $\beta = 90^\circ$, při větších úhlech nedochází k lomu světla ale k **totálnímu odrazu**, kdy α_m je mezní úhel, viz Obr.2.1.

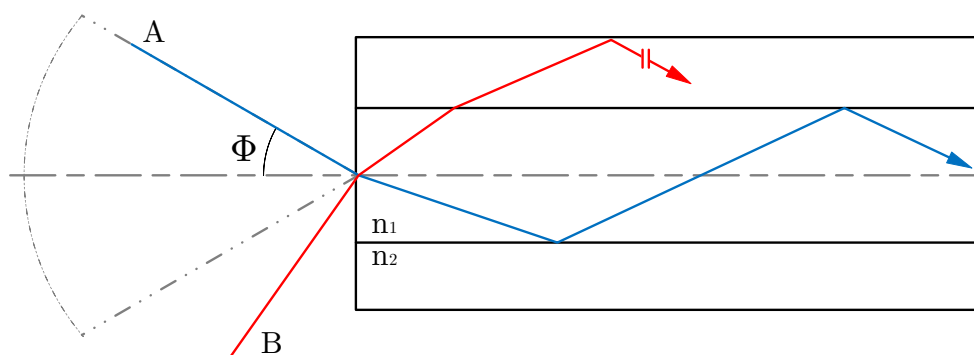


Obr. 2.1: Znázornění totálního odrazu [3].

Numerická apertura (NA) definuje největší úhel, který umožňuje vstupnímu paprsku být přenášen optickým vláknem. NA je důležitý parametr pro správné navázání vazeb mezi dvěma vlákny, optickým zdrojem a vláknem, popřípadě optickým detektorem a vláknem. Číselně je NA vyjádřena sinu maximálního úhlu Φ , pod kterým se světelné paprsky šíří od začátku trasy ke konci. Světelné paprsky, které budou dopadat pod větším úhlem, se šířit vláknem nebudou. Paprsek se neodrazí, tudíž dojde k lomu a postupně bude ztrácet výkon až do jeho zaniknutí. Pro vlákno se skokovou změnou indexu lomu lze vyjádřit vztah:

$$NA = \sin\Phi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.2)$$

kde n_1 je index lomu jádra, n_2 je index lomu pláště. Definuje se mezní úhel navázání, díky kterému se splňuje podmínka totálního odrazu světelných paprsků ve vláknu (A). Úhly větší (B) než mezní úhel navázání nesplňují tuto podmínku a paprsek se lomí do pláště a postupně se vytrácí, viz Obr.2.2 [4].



Obr. 2.2: Navázání světelného paprsku do optického vlákna [3].

2.2 Útlum

S přibývajícím vzdáleností optické trasy od zdroje postupně klesá výkon přenášeného signálu (podobné jako u metalických vedení). Útlum se zpravidla uvádí v dB/km, je dán poměrem vstupního světelného výkonu P_1 a výstupního světelného výkonu P_2 pro danou vlnovou délku λ podle vztahu:

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}, \quad [\text{dB}] \quad (2.3)$$

Z tohoto vztahu lze získat **měrný útlum** vlákna α , který představuje útlum na 1 km délky. Útlum podělíme délkou optického vlákna L :

$$\alpha = \frac{A}{L}. \quad [\text{dB/km}] \quad (2.4)$$

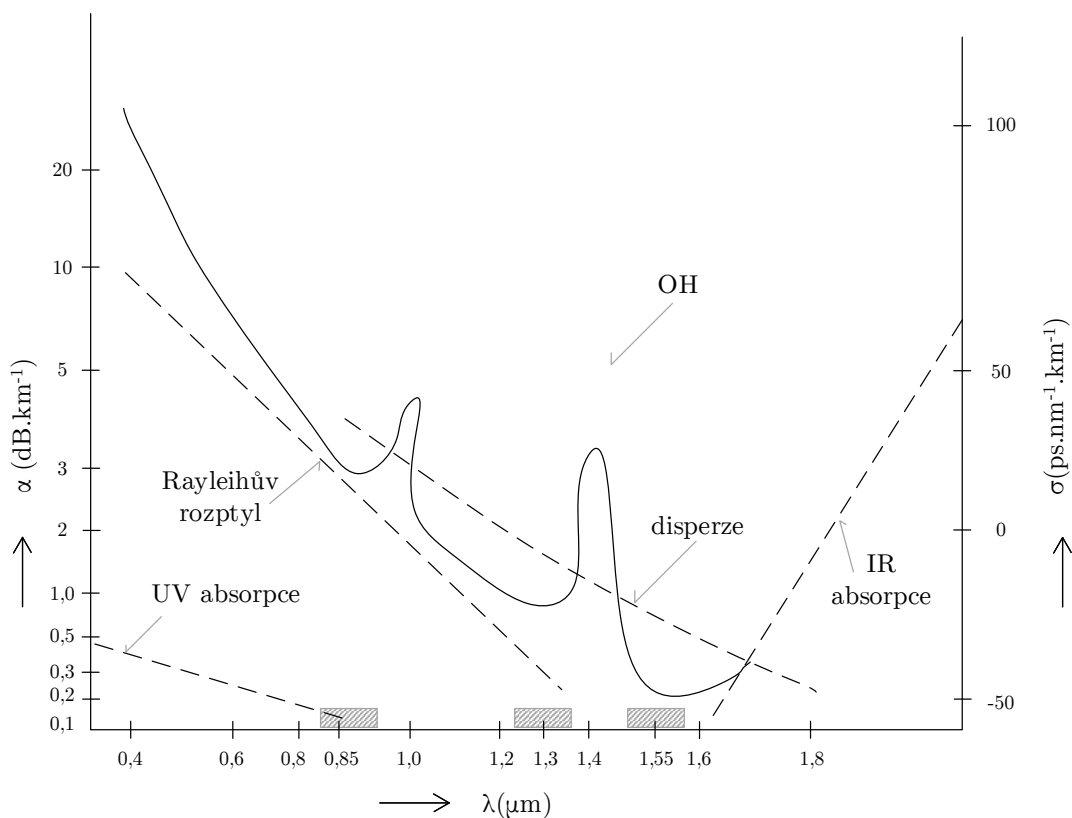
Hlavními příčinami útlumu optického signálu ve vláknu jsou materiálová absorpce prostředí a rozptyly na nehomogenitách [4].

2.2.1 Absorpce

Při odrazu a lomu světla v optickém vlákně dochází k velmi malé **absorpci** (pohlcení) světla materiálem jádra. Ztráty v jádru se projevují vlastní a nevlastní absorpcí, které jsou závislé na vlnové délce optického záření. Vlastní absorpce spočívá v pohlcení části optického záření molekulami materiálu jádra. Křemenný materiál vykazuje absorpční maxima v ultrafialové (UV) i infračervené oblasti (IR), tyto absorpce jsou velmi malé. Nevlastní absorpce je způsobena nečistotami v optickém materiálu, které pronikají do materiálu během výroby vlákna. Především jde o ionty kovů Fe, Cu, Cr a zejména **OH⁻ iontů (zbytková vlhkost)**, jak je vidět na Obr.2.3. V současnosti se vyrábějí vlákna označená LWP (Low Water Peak), která mají absorpci OH⁻ velmi malou [4].

2.2.2 Rozptyl

Materiálový rozptyl je způsoben nepravidelnostmi vznikajícími při chladnutí skleněného vlákna. Při dopadu světelného paprsku na nehomogenitu dochází k rozptylu, kdy se paprsky tříští do všech stran, čímž se ztrácí malá část výkonu. Zaznamenává se několik druhů rozptylů - Rayleighův, Mieův, Comptonův a Stokesův. Nejvíce důležitým je **Rayleighův rozptyl**, jenž vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Je důsledkem malých mikrozměn ve vlákně, projevující se jako přídavný útlum. Tento rozptyl nelze odstranit [4].



Obr. 2.3: Parametry optických vláken [5].

2.2.3 Ztráty ohybem vlákna

Při ohybu vlákna dochází ke změně úhlů dopadu a odrazu přenášených světelných paprsků. Následkem toho, některý paprsek překročí mezní úhel odrazu a pronikne do pláště. Na výstup se dostane menší počet paprsků, než kolik jich bylo na vstupu. Vlákná se dají ohýbat podle pokynů výrobce. Aby nedocházelo k velkým ztrátám, je nutné ohýbat vlákno s poloměrem ohybu, které zaručí nízké ztráty. Ohyby vlákna se dělí na **mikroohyby** a **makroohyby** [4].

Mikroohybové ztráty jsou poruchy přímočarosti osy vlákna. Chyby v geometrii vlákna způsobují mikroohybové ztráty, které mohou přelévat energii mezi sousedními vidy. Tyto ztráty mohou vznikat při výrobě nebo i během působení vnějších sil, které deformují plášť kabelu.

Makroohybové ztráty jsou běžné při praktickém využití optického vlákna, z důvodu nerovnosti na trase nebo připojení ke zdroji a detektoru. Tyto ztráty vznikají často při práci s vlákny, kdy vlákno nesmí být vystaveno menšímu průměru než 60 mm [5].

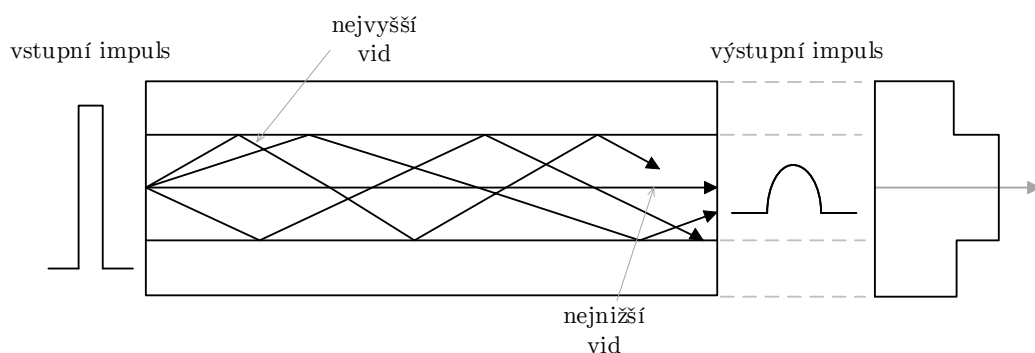
2.3 Disperze

Tento parametr je hlavní důvod zkreslení signálu, který prochází optickým vláknem. Charakterizuje vlákna z hlediska maximální přenosové rychlosti a určuje šířku přenášeného pásma. Disperze se dělí na tři základní druhy a poddruhy:

- vidová disperze,
 - materiálová disperze,
 - vlnovodná disperze,
 - profilová disperze,
- polarizační vidová disperze.

2.3.1 Vidová disperze

Tento druh disperze je hlavním činitelem omezující šířku přenášeného pásma u mnohavidových vláken, viz Obr.2.4. Pro jednovidová vlákna je vidová disperze téměř nulová, tudíž se u těchto vláken zanedbává.



Obr. 2.4: Vznik disperze v mnohovidovém vláknu [1].

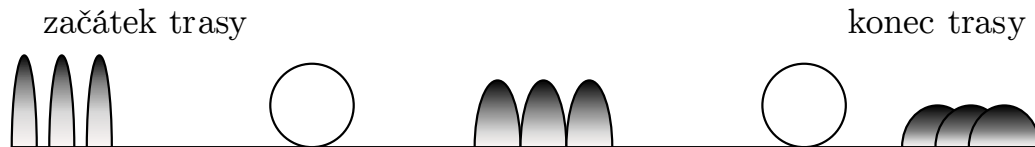
Vidová disperze se projevuje u dlouhých vláken při přenosu dat na větší vzdálenosti. Vláknem se šíří vidy, jejichž trajektorie se liší, vyšší vidy se šíří pomaleji než nižší vidy, tudíž jsou mezi jednotlivými vidy časové rozestupy a dochází ke zpoždění. Hodnota pro mnohavidové vlákno se skokovým indexem lomu je 20 ns/km, což umožňuje přenos šířky pásma desítek MHz, gradientní vlákno má hodnotu 50 ps/km a přenáší jednotky GHz.

2.3.2 Chromatická disperze

V optickém vlákně se každá spektrální složka šíří odlišnou skupinovou rychlostí. Jednotlivé spektrální složky dorazí na konec vlákna v rozdílných okamžicích, tudíž dochází ke zkreslení přenášeného signálu, viz Obr.2.5. Tento jev rozdílných spektrálních složek přenášené vláknem se nazývá chromatická disperze. Tento druh disperze bývá nejčastěji charakterizován tzv. koeficientem chromatické disperze D , který je definován vztahem:

$$D(\lambda) = \frac{d\tau_g(\lambda)}{d(\lambda)}, \quad \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}) \quad (2.5)$$

kde $\tau_g(\lambda)$ je skupinové zpoždění signálu. Koeficient chromatické disperze je udáván v ps/(nm·km), a lze interpretovat jako celkové rozšíření Gaussovského impulsu v ps při průchodu vláknem 1 km a při použití zdroje záření se spektrální pološířkou 1 nm.



Obr. 2.5: Vliv chromatické disperze na signál v optickém vlákně [4].

Chromatická disperze vzniká sloučením tří disperzních složek: materiálové, vlnovodné a profilové disperze.

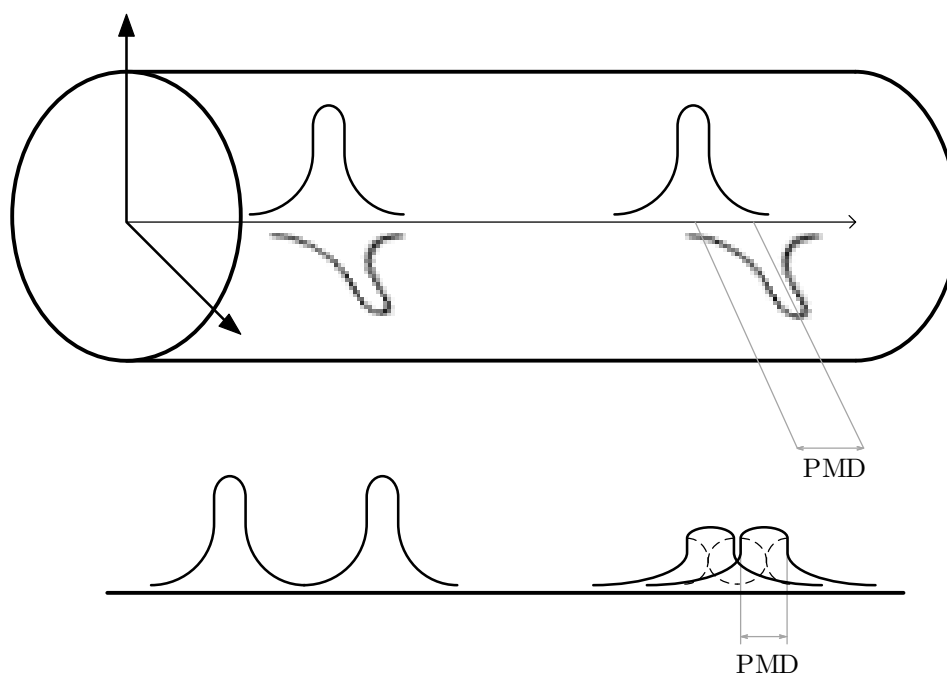
Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu materiálu optického vlákna na vlnové délce záření, tudíž se vlnové délky šíří různou rychlostí, což snižuje přenosovou kapacitu. Má nepatrný vliv na disperzi vidovou, jelikož ovlivňuje dobu průchodu jednotlivých vidů.

Vlnovodná disperze vychází ze závislosti skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. Se změnou kmitočtu se ve struktuře mění tvar podélného pole vidu. Hlavní význam má v jednovídných vláknech, jako fázové zkreslení signálu, a na vlnových délkách. Pro mnohovidová vlákna je tato disperze zanedbatelná. Parametr vlnovodné disperze je vždy záporný, umožňuje kompenzovat materiálovou disperzi. Vzájemná kompenzace vyplývá z vlnovodné disperze, která způsobuje zpoždění vln s vyšší vlnovou délkou, oproti materiálové disperze, která zpomalí vlnu s kratší délkou vlny.

Profilová disperze je dána závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření a z toho plynoucí závislosti rychlosti šíření vlny na kmitočtu. Profilová disperze je velmi malá a projevuje se u vysokých přenosových rychlostí.

2.3.3 Polarizační vidová disperze

U jednovidových vláken se projevuje polarizační vidová disperze (PMD), která je definovaná jako střední hodnota rozdílu grupové rychlosti mezi dvěma hlavními stavy polarizace v optickém vlákně. Vid ve vlákně se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. V důsledku nedokonalostí vlákna, zejména kruhová nesymetrie vlákna, se konstanty šíření i útlum obou polarizací mění. Dochází ke zpoždění jedné polarizace vůči druhé a v důsledku dochází na konci trasy mezi oběma polarizačními vidy ke zpoždění a roztažení impulsu, jak lze vidět na Obr.2.6. Tento jev omezuje maximální přenosové rychlosti a taktéž dochází ke snížení odstupu signálu od šumu. PMD je zcela náhodná pro danou trasu a nelze její hodnotu dostatečně přesně vyjádřit, což ztěžuje způsoby kompenzace jejích vlivů [1] [2] [4].



Obr. 2.6: Vliv polarizační vidové disperze [4].

2.4 Šířka pásma

Šířka pásma optického vlákna udává nejvyšší kmitočet přenášeného signálu, který může být přenesen na vzdálenost 1 km, udává se v Mhz (Ghz)·km. Šířka pásma závisí na ostatních parametrech optického vlákna, i na konstrukci a materiálu. Největší vliv

na šířku pásma má vlnová délka, kde závisí na hodnotě vlnové délky, např. 850 nm má šířku pásma 160 MHz·km, při 1300 nm může mít šířku pásma 500 MHz·km [4].

2.5 Diagram oka

Pro přenos optickým vláknem se využívá digitální signál, na jehož vlastnostech závisí celá optická trasa. Ke zjištění kvality a parametrů přenosového signálu se používá nástroj diagram oka, který v podstatě určuje rozdíly mezi vysílaným a přijímaným digitálním signálem. Analýzu diagramu oka lze použít pro kvantifikaci kvality signálu a kontrolu přijímaného signálu, zde jej lze dekodovat. Signál se během přenosu zkresluje a mění svůj tvar, viz Obr.2.7.

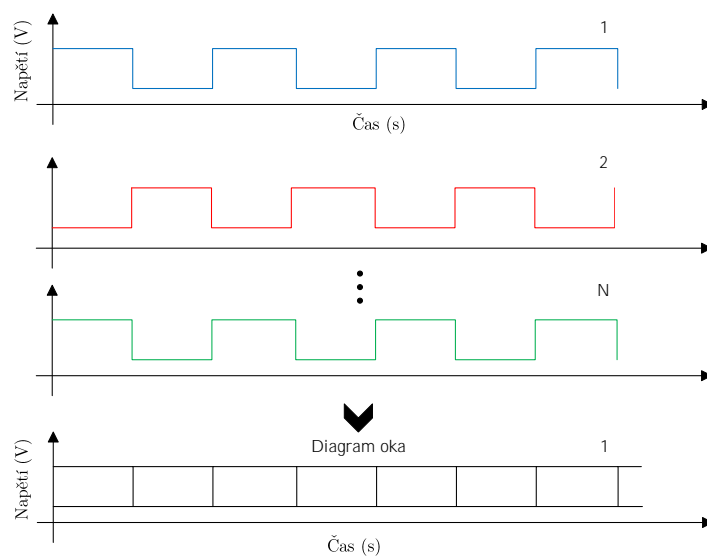


Obr. 2.7: Zkreslení signálu při přenosu [7].

Především při dlouhých vzdálenostech dochází k velkému zkreslení při působení útlumu a disperzí. Diagram oka poskytuje pohled na vyhodnocení optické přenosové charakteristiky systému [7].

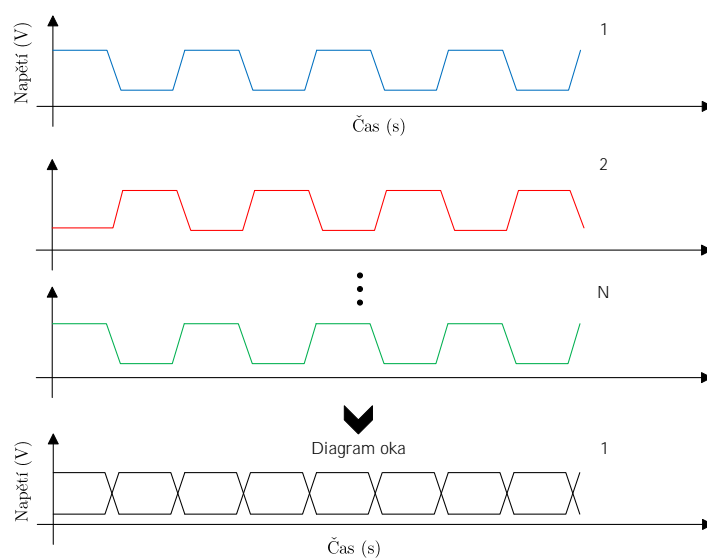
2.5.1 Vznik a analýza diagramu oka

Diagram oka vzniká vrstvením vzorků přenášeného digitálního signálu, kde logická 1 a 0 tvoří hranice diagramu. Ideální tvar by měl obsahovat všechny možné bitové sekvence, podle kterých dokážeme diagnostikovat chyby v přenosovém systému. Vzniklý graf připomíná oko, tudíž tento nástroj dostal název diagram oka (Eye diagram, Eye pattern). Pouze ze sledování diagramu můžeme zjistit správný tvar signálu (šířka, výška) nebo pokud má signál velký šum. Na Obr.2.8 a Obr.2.9, jsou značeny rozdíly mezi ideálním a reálným diagramem.



Obr. 2.8: Ideální signál a diagram oka [7].

V reálném případě se střídání logické 1 a 0 nebude stávat ihned, ale vzestup a pád z logické 1 na 0 bude trvat jednotku času. Tento jev, též známý jako jitter, zapříčiní křížení diagramu.

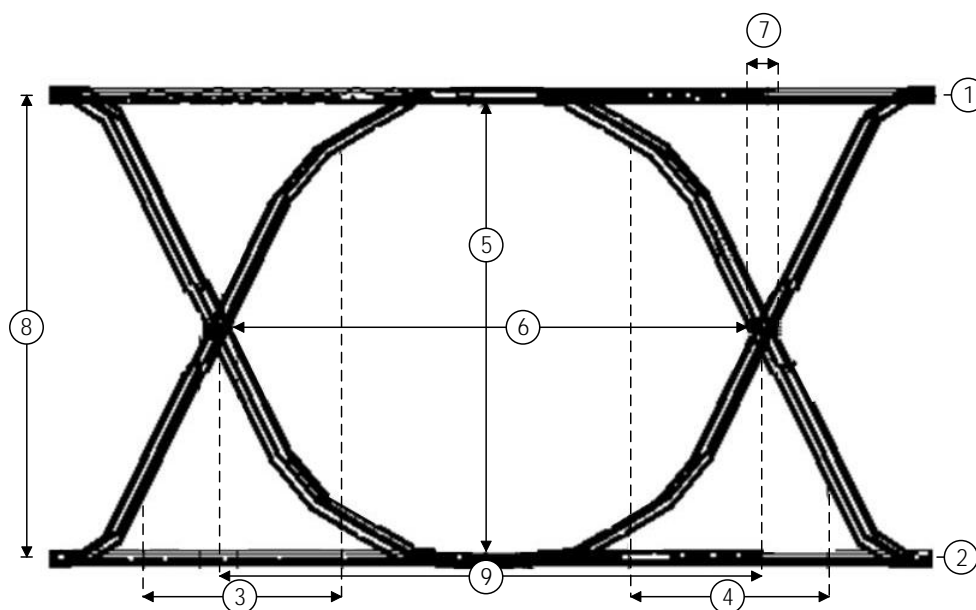


Obr. 2.9: Reálný signál a diagram oka [7].

K analýze diagramu oka není potřeba celý signál, ale pouze 3 za sebou jdoucí signály, které se pomocí funkcí osciloskopu nebo programu zobrazí [7]. Z diagramu oka se určují tyto klíčové definice, viz Obr.2.10, Tab.2.1:

Tab. 2.1: Definice, které se dají vyčíst z diagramu oka

1 Úroveň nula	Nulová úroveň je měřítkem střední hodnoty logické 0 diagramu oka.
2 Úroveň jedna	Úroveň jedna je měřítkem střední hodnoty logické 1 diagramu oka.
3 Čas nárůstu	Doba nárůstu je měřítkem přechodového času dat z úrovně 0 (10%) na úroveň 1 (90%).
4 Čas pádu	Doba pádu je měřítkem přechodového času dat z úrovně 1 (90%) na úroveň 0 (10%).
5 Výška oka	Výška oka je měřítkem vertikálního otevření diagramu. Ideální otevírání oka by se měřilo od úrovně jedno po úroveň nuly. Šum však způsobuje zavírání oka, tudíž se musí měřit i se šumem.
6 Šířka oka	Šířka oka je měřítkem horizontálního otevření diagramu mezi body křížení oka.
7 Jitter	Jitter je odchylka přechodu od ideálního času způsobená odrazy k jiným přechodům.
8 Amplituda oka	Amplituda oka je rozdíl mezi úrovní 1 a 0.
9 Bitová rychlost	Bitová perioda je měřítko horizontálního otevření diagramu v bodech křížení oka.



Obr. 2.10: Diagram oka a jeho analýza [8].

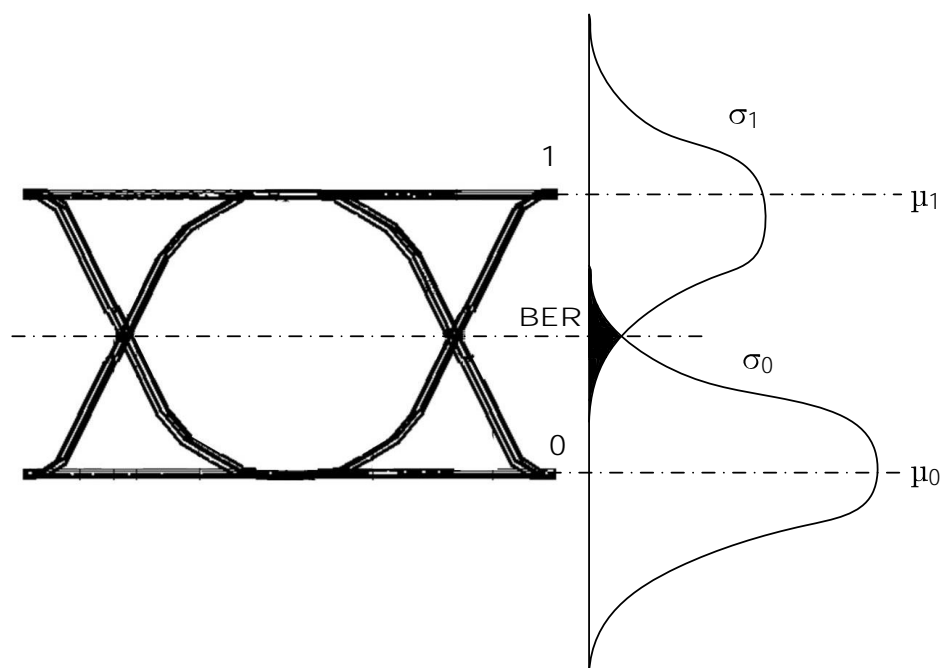
2.5.2 Q-faktor, BER

Diagram oka umožňuje grafické znázornění vlivu rušení v místě realizovaného měření. Tyto znázornění popisují parametry Q-faktor a BER (bitová chybovost kanálu). Q-faktor měří kvalitu přenosového signálu z hlediska poměru signálu k šumu (SNR). Bere v úvahu fyzické poškození signálu (například šum, chromatická disperze a jakékoliv polarizace nebo nelineární efekty), které mohou poškodit signál a nakonec způsobit bitové chyby. Vyšší hodnota Q-faktoru, tím lepší je SNR a tím nižší pravděpodobnost bitových chyb. Q-faktor je definován jako rozdíl středních hodnot obou úrovní signálu (úroveň pro bit „1“ a úroveň pro „0“ bit) děleno součtem odchylek na dvou úrovních signálu 2.6, viz Obr.2.11:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad [-] \quad (2.6)$$

kde:

Q	Q-faktor,
μ_1	střední hodnota úrovně logické 1,
μ_0	střední hodnota úrovně logické 0,
σ_1	odchylka hodnot úrovně logické 1,
σ_0	odchylka hodnot úrovně logické 0.



Obr. 2.11: Souvislost Q-faktoru a bitové chybovosti kanálu [9].

V optické trase při velkém rušení dochází ke vzniku chyb. Četnost těchto chyb popisuje parametr BER (bitová chybovost kanálu), který je dán základním poměrem počtu chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenesených bitů 2.7:

$$BER = \frac{N_E}{N_A}, \quad [-] \quad (2.7)$$

kde:

N_E počet chybných bitů,

N_A celkový počet bitů.

Bitová chybovost kanálu BER je nepřímo úměrná Q-faktoru, pokud je Q-faktor vysoký, kvalita signálu je dobrá a dochází k málo chybám, tudíž hodnota BER je menší. BER lze vyjádřit pomocí Q-faktoru rovnicí 2.8 [9]:

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right). \quad [-] \quad (2.8)$$

3 Optická trasa

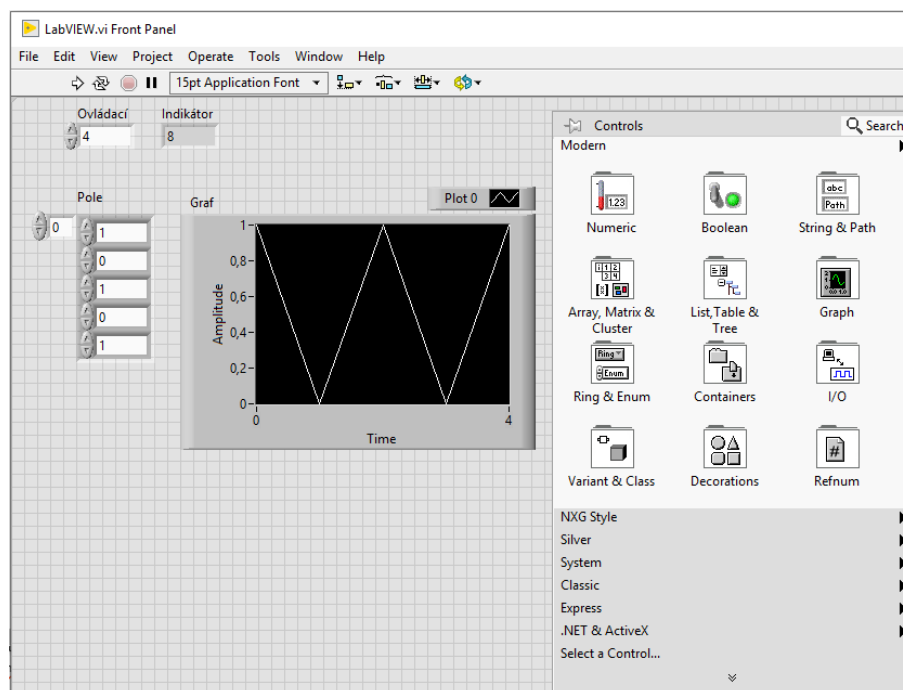
V práci bylo nutné sestavit simulovanou trasu. Platforma Red Pitaya zajišťuje generace a opětovný příjem dat ze simulované optické trasy, kterou zajišťují laser a fotodetektor od firmy Koheron. K zobrazení simulace se využívá grafický návrhový software LabView.

3.1 LabVIEW

Program LabVIEW je systémový a vývojový nástroj od společnosti National Instruments (NI). Využívá grafický programovací jazyk pro vývoj aplikací, získávání dat, analýzu signálů nebo hardwarového měření. LabVIEW umožňuje vizualizaci dat z jakéhokoliv zařízení od NI nebo od třetích stran [10].

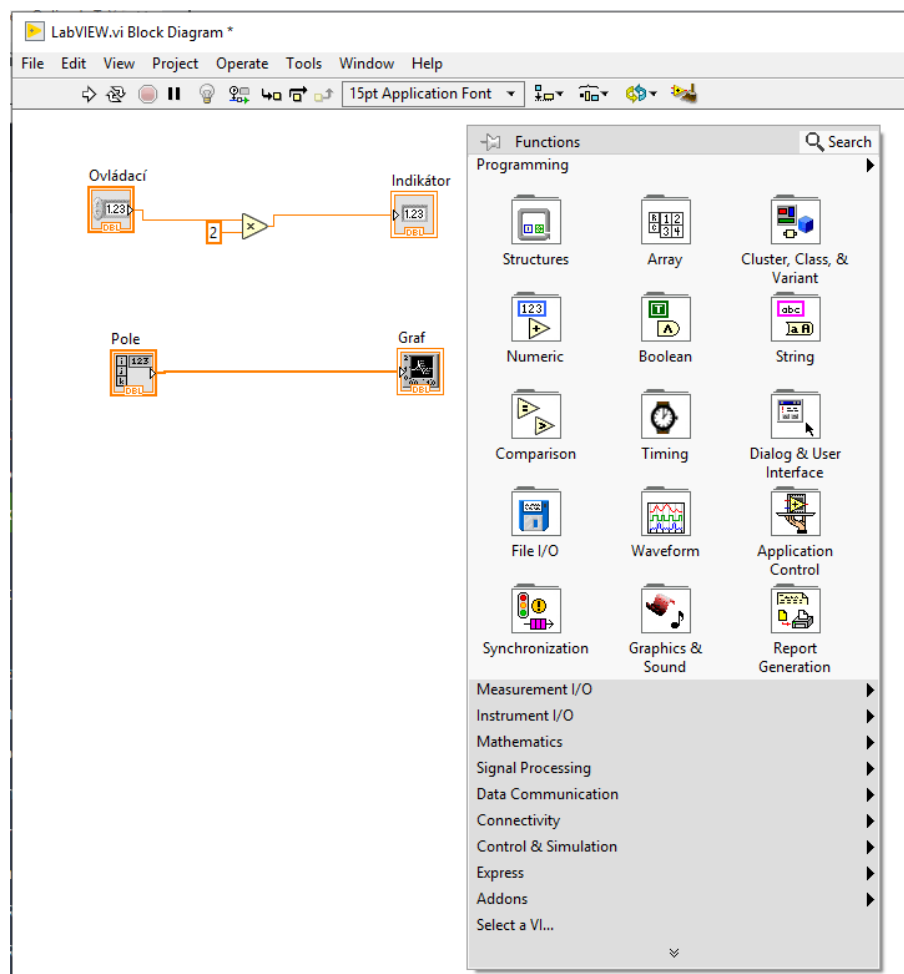
3.1.1 Grafické vývojové prostředí

LabView využívá k programování dvě základní pracovní okna - přední panel, blokové schéma, a palety ovládacích prvků a funkcí. Přední panel představuje uživatelské rozhraní vytvořeného projektu. Pro vytvoření rozhraní se využívá paleta ovládacích prvků, která je rozdělena do několika kategorií a podkategorií. Na paletě se nachází několik typů ovládacích prvků: numerické, boolean, řetězce, pole a grafy. Tyto prvky se dále dělí na ovládací prvky nebo indikátory. Ovládací prvky se používají pro zadávání dat a vstupů, a lze je měnit. Indikátory zobrazují výsledek, který nelze měnit, viz Obr.3.1.



Obr. 3.1: Přední panel, paleta ovládacích prvků, ovládací prvky a indikátory.

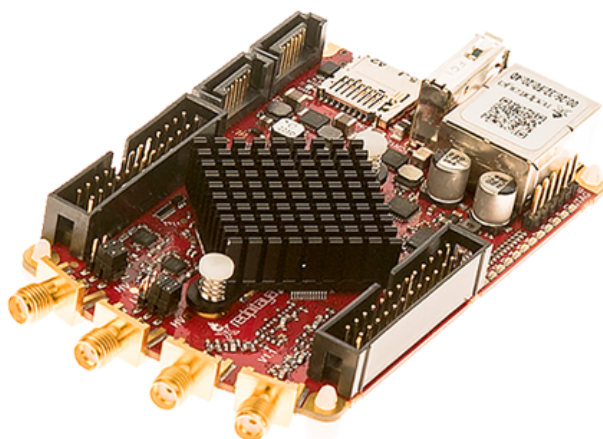
Blokové schéma se používá k samotnému programování pomocí palety funkcí. Po vytvoření rozhraní v předním panelu se vytvořené objekty zobrazí jako terminály. Terminály jsou vstupní a výstupní porty pro výměnu informací mezi předním panelem a blokovým schématem. K daným terminálům lze přidat některou z funkcí, k tomu slouží paleta funkcí, která má podobné rozdělení jako paleta ovládacích prvků, ale navíc obsahuje kategorii struktur (podmínky FOR, WHILE). Terminály i přidané funkce v blokovém schématu se spojují pomocí drátů, které přenášejí data mezi těmito entitami, viz Obr.3.1.



Obr. 3.2: Blokové schéma s paletou funkcí a propojenými terminály.

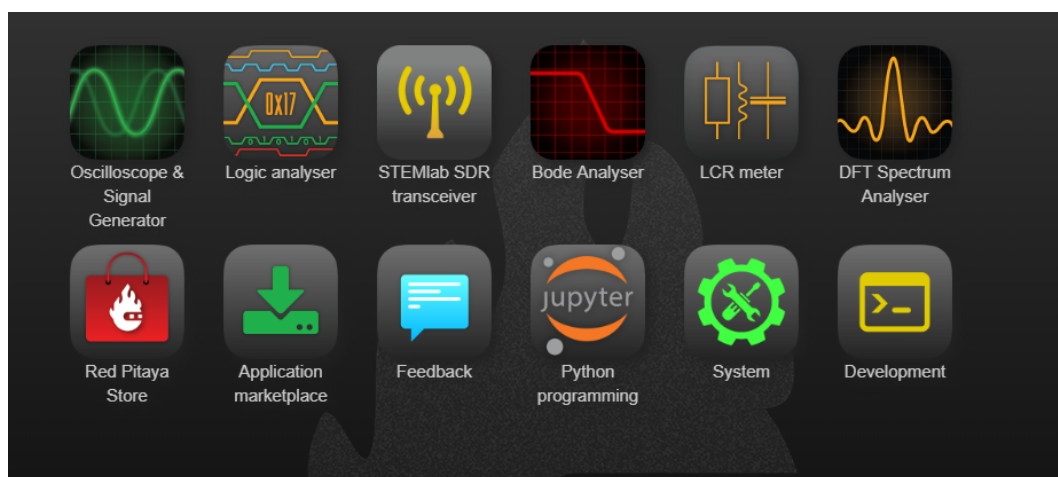
3.2 Red Pitaya

Společnost Red Pitaya (RP) založena v roce 2013 se zabývá moderními testovacími a měřicími technologiemi. V praktické části je použita platforma STEMLab, kterou lze vidět na Obr.3.3. Platforma je napájena pomocí 5 V/2 A micro USB adaptéru a komunikuje s počítačem pomocí ethernetového kabelu nebo Wi-Fi. Dále se na platformě nachází dva výstupy pro generování signálu a dva vstupy pro sběr dat. Důležitou součástí platformy je také SD karta, na které je nahrána aktuální verze operačního systému (OS), který je postaven na bázi Linuxu (odlehčená verze Ubuntu), [11].



Obr. 3.3: STEMLab platforma [11].

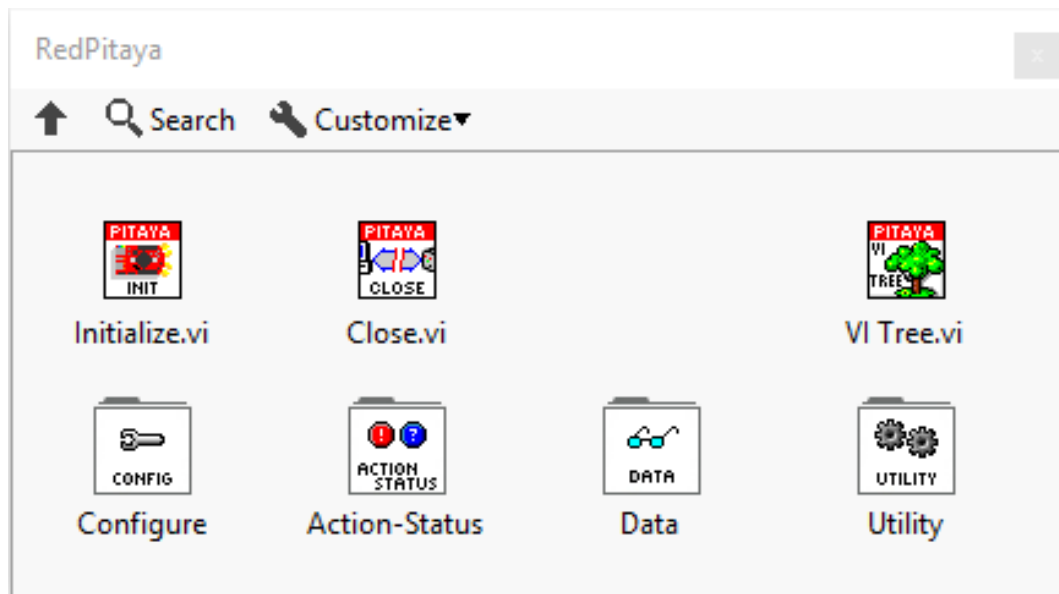
Pro zobrazení osciloskopu a dalších funkcí se využívá grafické rozhraní, na které se lze připojit z jakéhokoli prohlížeče. Po zadání IP adresy do URL prohlížeče nebo zadání kódu ve tvaru RP-xxxxxx.local/ (xxxxxx představují šest posledních znaků MAC adresy STEMLab platformy) se zobrazí hlavní stránka grafického uživatelského rozhraní (GUI), viz Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Grafické uživatelské rozhraní Red Pitaya.

3.2.1 Práce s LabView

Stemlab platforma lze vzdáleně ovládat přes LAN nebo Wi-Fi rohraní pomocí softwaru Matlab, Python nebo LabView. Pro vzdálené připojení je potřeba vždy na webovém rohraní zprovoznit SCPI server (Standardizované příkazy pro programovatelné přístroje). Pro připojení přes LabView je nutné zkopírovat soubor instr.lib do složky LabVIEW instalace. V samotném LabView se tento instrument nachází v blokovém diagramu -> Instrument I/O, viz Obr. 3.5.



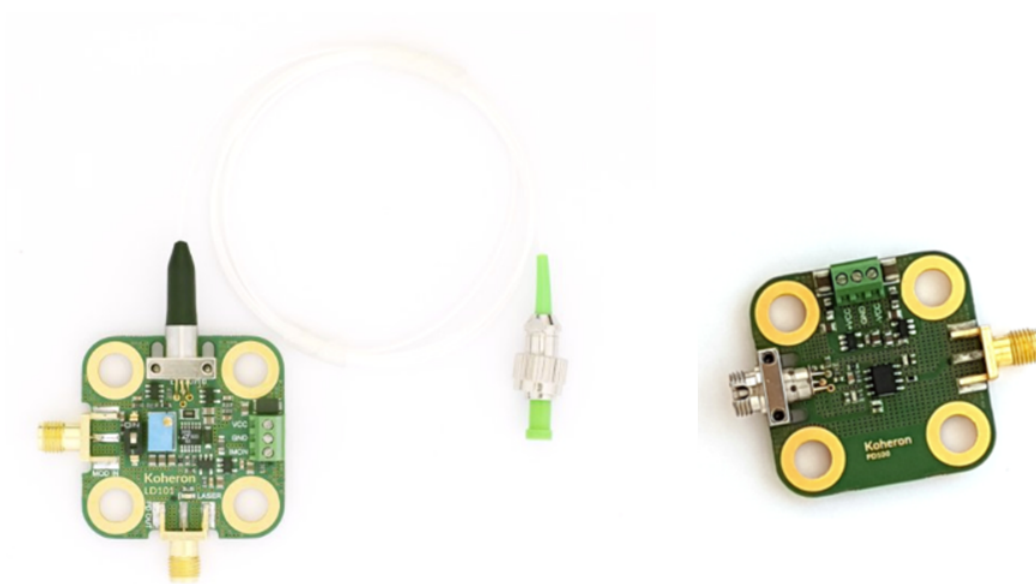
Obr. 3.5: Funkce Red Pitaya v LabView.

- Initialize
 - navazuje spojení s RedPitaya
- Close
 - ukončuje spojení s RedPitaya
- Configure
 - obsahuje funkce, které umožňují nastavení generovaného a přijímaného signálu
- Action-Status
 - obsahuje funkce, které rozšiřují možnosti nastavení signálu
- Data
 - obsahuje čtecí funkce, ze kterých lze získat výstup daného projektu
- Utility
 - obsahuje funkce, díky kterým lze zadávat ručně SCPI příkazy
- VI Tree
 - zobrazuje všechny funkce RedPitaya

3.3 Simulovaná optická trasa

V této práci je použita laserová technologie od společnosti Koheron. Používané moduly se dělí na laser s optickým vláknem a fotodetektor, které lze vidět na Obr. 3.6. Do modulu DFB (distributed feedback) laseru proudí generovaný signál z platformy STEMLab, který se převádí na digitální signál a je vyslán přes optické vlákno na

vstup fotodetektoru, na jejímž výstupu se signál opět převádí z digitálního na analogový. Měřený signál se zaznamenává na jeden ze vstupů STEMLab platformy a je prezentován v programu LabView nebo samotné webové aplikaci RedPitaya. Parametry laseru a fotodetektoru jsou vypsány v Tab. 3.1 .



Obr. 3.6: Laser a fotodetektor Koheron [12].

Tab. 3.1: Parametry laseru LD101 a fotodetektoru PD100 [12].

Nízkošumový laser LD101	
Vlnová délka	1550 nm
Optický výkon (30 mA)	3 mW
Optický výstup	1 m SM vlákno s FC/APC konektorem
Šířka pásma	40 MHz
Nízkošumový fotodetektor PD100	
Vlnová délka	900 - 1700 nm
Šířka pásma	1,6 kHz - 105 MHz
Výstup	SMA

4 Simulační program

Cílem bylo dosáhnout reálné simulace disperze optického přenosu s rostoucí délkou trasy. Program pracuje s moduly laseru a fotodetektoru, které simulují optickou trasu, platformou Red Pitaya, která generuje a následně přijímá pulsy, a programové prostředí LabView, ve kterém je vytvořeno grafické rozhraní a požadované funkce.

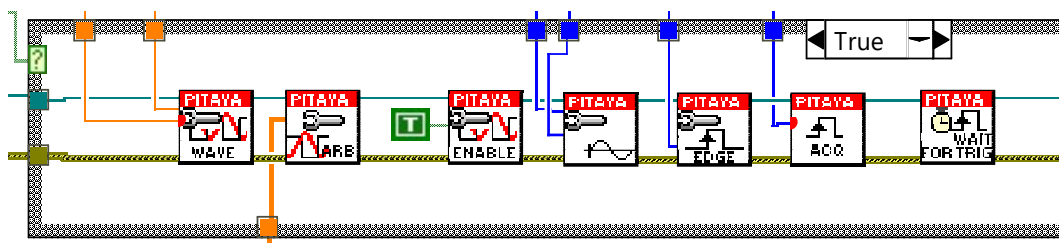
4.1 Popis simulace

Program se skládá ze dvou hlavních částí: část generování a získání signálu přes platformu Red Pitaya, kdy je vytvořeno spojení pomocí SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation) serveru přes TCP protokol. Po zapnutí serveru se přiřadí IP adresa, která se poté vloží do LabView kódu. Generace pulsů se nastaví pomocí frekvence, amplitudy a generovaných dat, které se vytváří přímo v programu. Výsledný signál prochází bloky Red Pitayi a nakonec jej čtecí blok zobrazí v grafu. Místo klasické časové osy, Red Pitaya využívá vzorky (samples), jejich maximální počet je 16384.

Druhá část programu již pracuje s vygenerovanými pulsy, které se poté upravují dle zadání. Simulace umožňuje změnu délky trasy mezi vysílačem a přijímačem, díky které se v získaných pulsech projevuje disperze. Amplituda i frekvence je konstantní, mění se pouze hodnota disperze podle délky trasy a šířky pásma. K této části patří i diagram oka, který ze zobrazuje tvar vysílaných pulsů.

4.1.1 Sestavení spojení

K sestavení spojení se využily funkční bloky navázání (zadáva se IP adresa SCPI serveru) a ukončení, které jsou základními bloky pro úspěšné spojení platformy RP a LabView. Dále bloky pro konfiguraci signálu a blok čtení/výpisu signálu. Konfigurace spočívá v nastavení frekvence a amplitudy signálu, generaci vlastních dat a jejich příjem, a nastavení triggeru, viz Obr. 4.1.

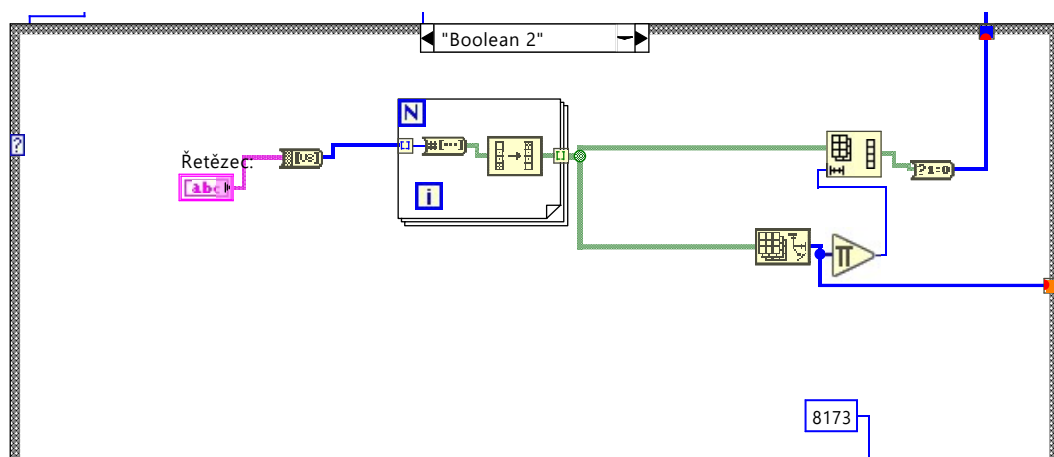


Obr. 4.1: Konfigurace signálu bloky Red Pitaya.

V programu je použita konstantní hodnota frekvence i amplitudy, aby bylo dosaženo nejlepšího grafického výsledku simulované disperze. Tyto hodnoty jsou nastaveny v bloku Konfigurace signálu (druhý blok zleva, Obr. 4.1, první blok zleva). Další bloky jsou: **Konfigurace vlastních dat**, který přijímá generovaná data a posílá je dál ke zpracování, a **Nastavení přijímané části signálu**, ve kterém se nastavuje decimální faktor. Tento faktor je nastaven na hodnotu 8 a určuje časovou délku získaného signálu. Následují bloky nastavení triggeru, ve kterých lze nastavit hodnoty a typ triggeru. V programu je nastaven trigger pro náběžnou hranu.

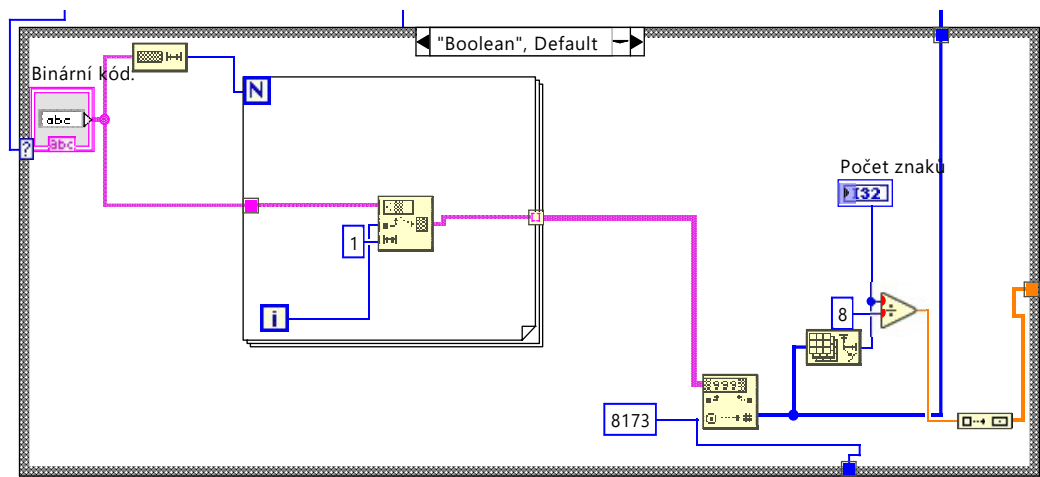
Generace vlastních dat

Pro generaci pulsů jsou na výběr dva způsoby: pomocí řetězce nebo přímo binárního kódu. Řetězec je nutné převést do binárního kódu, který se posílá do bloku generování pulsů. Postup převodu je zobrazen na Obr. 4.2, řetězec se převádí do tvaru boolean, kdy odpovídá hodnotám true nebo false, které jsou převedeny na hodnoty 1 a 0.



Obr. 4.2: Generace dat z řetězce.

Binární kód se také zadává jako řetězec, ale jeho zpracování je odlišné. Hodnoty se rozdělí po jednom znaku a poté se celé pole řetězce převádí na číselné pole, které se posílá do bloku generování, zpracování lze vidět na Obr. 4.3.

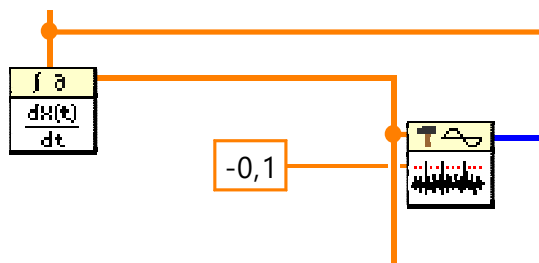


Obr. 4.3: Generace dat z binárního kódu.

Generovaný signál je nutné upravit, aby se neopakoval. Číselné pole bylo doplněno o hodnoty 0,5, které se přičítají za pole a zaplnily všech 16384 vzorků.

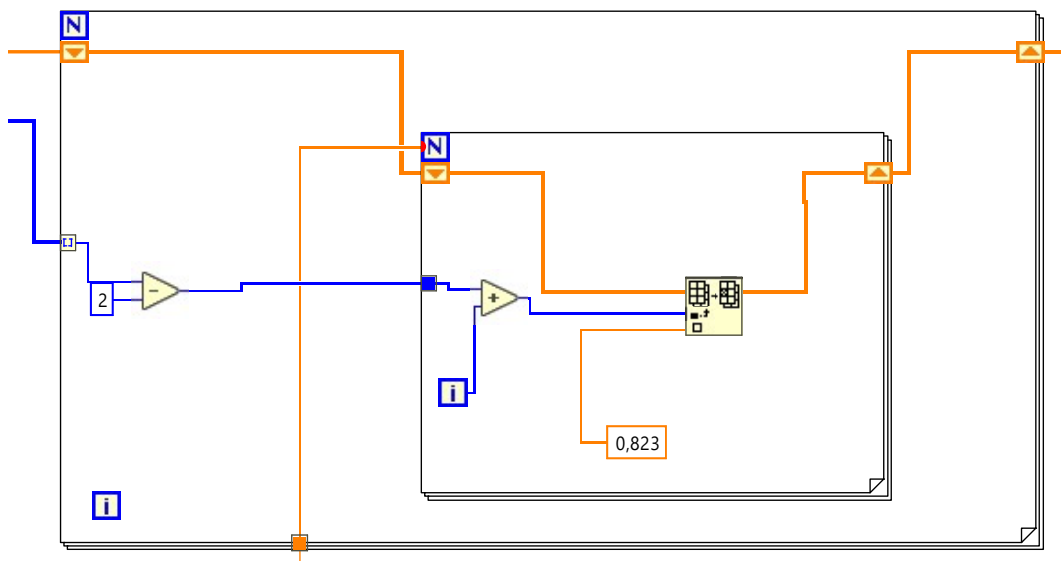
4.1.2 Simulace disperze

Přijatý signál ze čtecího bloku je postupně zpracováván. Prvním krok je nalezení náběžných a sestupných hran. K tomu je využit blok derivace vzorkovaného signálu, kdy je signál zderivován. Tudíž vznikne signál, u kterého snadno pomocí bloku detekce práhů zjistíme pozice hran, viz Obr. 4.4.



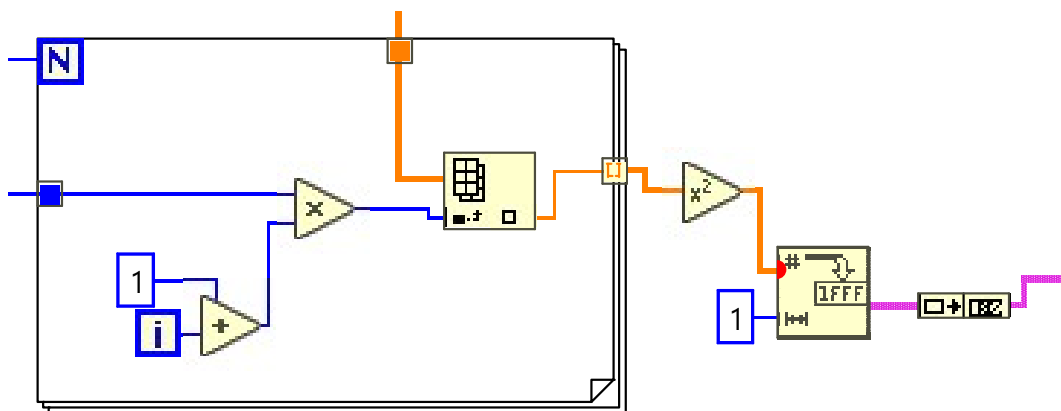
Obr. 4.4: Derivace signálu a zjištění hran.

Pro sestupnou hranu se hledá práh $-0,1$, pro náběžnou hranu práh $0,1$. Nalezené hrany se dále využívají v druhém kroku, kde se k nalezeným hranám přičítají hodnoty. Počet hodnot závisí na nastavené délce simulované trasy a použité šířky pásma, tyto hodnoty se zadávají během práce s programem. Pro simulaci disperze se využívá dvakrát podmínka **for**. V první podmínce se načtou všechny hrany, ve druhé podmínce se přidávají hodnoty podle změny trasy a šířky pásma, podmínky jsou zobrazena na Obr. 4.5. Signál prochází oběma podmínkami pro náběžnou i sestupnou hranu, výsledkem je rozšiřování jednotlivých pulsů na základě změny parametrů.



Obr. 4.5: Podmínky pro simulaci disperze.

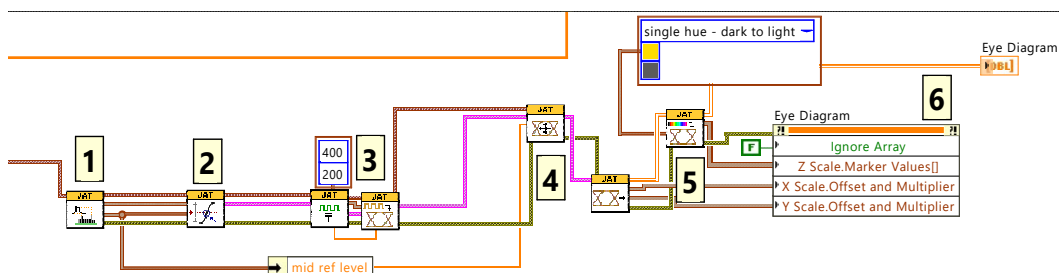
Třetí krok spočívá ve zpětném překladi výsledného signálu na binární posloupnost. K překladi se využívá vybrání každého x -tého prvku v poli signálu. Například pro šířku pásma 1 MHz odpovídá hodnota logické jedničky nebo nuly 16 vzorků, tudíž se pomocí sestaveného kódu vybere každý 16 prvek a pomocí převodu na řetězec, se zobrazí výsledný binární kód, viz Obr. 4.6.



Obr. 4.6: Vybrání každého x -tého prvku z pole.

Diagram oka

Zpracovaný signál v předchozích krocích je zdrojem dat pro diagram oka. Vytvoření diagram se zpracovalo v šesti krocích, kroky lze vidět na Obr. 4.7:



Obr. 4.7: Diagram oka v programu.

- **1** - definice náběžných a sestupných hran ze vstupního signálu
- **2** - určuje čas a místo, kdy signál překračuje určitou úroveň, umožňuje identifikovat společnou pozici všech přechodů
- **3** - tyto bloky konstruuji a rozdělují signál na jednotlivé segmenty, které se dále používají pro sestavení diagramu oka
- **4** - formátování segmentů a možnost přidání parametrů: výška, šířka, maska diagramu oka
- **5** - nastavení barevného rozložení diagramu - možnost dvou barev nebo "duhy"
- **6** - nastavení grafu diagramu oka - využití **property node**, který v tomto případě slouží k zadání vlastností grafu

5 Laboratorní úloha

Cíl

Cílem laboratorní úlohy je simulace disperze optického přenosového systému za pomoci změny vzdálenosti a šířky pásma. Dále analýza přenášeného signálu pomocí nástroje diagramu oka.

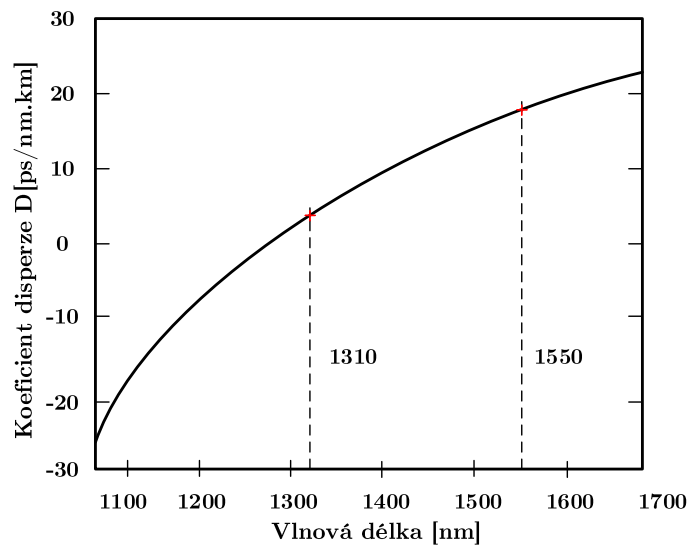
Teorie

Optický přenosový systém využívá pro přenos optická vlákna. Vlákna přenáší informaci pomocí světelných paprsků s danou vlnovou délkou. Mnohavidová vlákna obvykle pracují na vlnové délce 870 nm, jednovidová na délkách 1310 nm a 1550 nm. Výhodou optických vláken je velká šířka pásma (GHz, THz), nízký útlum, odolnost proti přeslechům a bezpečnost přenosu.

Charakteristickou vlastností optických vláken je světelná disperze. Tento parametr je hlavním důvodem zkreslení optického signálu. Rozlišujeme tři hlavní druhy disperze: vidová, chromatická a polarizační vidová disperze u jednovidových vláken. V této úloze se budeme zabývat především chromatickou disperzí, kde různé spektrální složky signálu se šíří vláknem rozdílnou rychlostí. Je tvořena třemi složkami:

- **Materiálová disperze** je způsobena závislostí indexu lomu materiálu optického vlákna na vlnové délce záření, tudíž se vlnové délky šíří různou rychlostí, což snižuje přenosovou kapacitu. Má nepatrný vliv na disperzi vidovou, jelikož ovlivňuje dobu průchodu jednotlivých vidů.
- **Profilová disperze** je dána závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření a z toho plynoucí závislosti rychlosti šíření vlny na kmitočtu. Profilová disperze je velmi malá a projevuje se u vysokých přenosových rychlostí.
- **Vlnovodná disperze** vychází ze závislosti skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. Se změnou kmitočtu se ve struktuře mění tvar podélného pole vidu. Hlavní význam má v jednovidových vláknech, jako fázové zkreslení signálu, a na vlnových délkách. Parametr vlnovodné disperze je vždy záporný, umožňuje tedy kompenzovat materiálovou disperzi.

V této simulaci se využívá jednovidové vlákno s vlnovou délkou 1550 nm, jehož disperze se pohybuje okolo 18 ps/nm·km, Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Celková disperze u jednovlňových vláken [1].

Celková disperze je charakterizována tzv. koeficientem chromatické disperze D , který je dán vztahem:

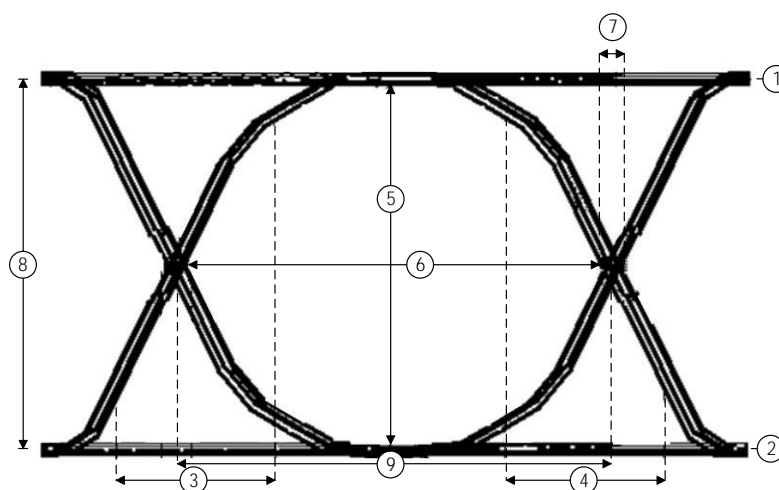
$$D(\lambda) = \frac{d\tau_g(\lambda)}{d(\lambda)}, \quad \text{ps/nm}\cdot\text{km} \quad (5.1)$$

kde $\tau_g(\lambda)$ je skupinové zpoždění signálu.

K zjištění kvality a parametrů přenosového signálu se používá nástroj **diagram oka**, který v podstatě určuje rozdíly mezi vysílaným a přijímaným digitálním signálem. Analýzu diagramu oka lze použít pro kvantifikaci kvality signálu a kontrolu přijímaného signálu, viz Obr. 5.2, Tab. 5.1. Pro diagram oka platí, čím více vzorků, tím lepší a přesnější analýza prvků, které lze vyčíst.

Tab. 5.1: Definice, které se dají vyčíst z diagramu oka

1 Úroveň nula	Nulová úroveň je měřítkem střední hodnoty logické 0 diagramu oka.
2 Úroveň jedna	Úroveň jedna je měřítkem střední hodnoty logické 1 diagramu oka.
3 Čas nárůstu	Doba nárůstu je měřítkem přechodového času dat z úrovně 0 (10%) na úroveň 1 (90%).
4 Čas pádu	Doba pádu je měřítkem přechodového času dat z úrovně 1 (90%) na úroveň 0 (10%).
5 Výška oka	Výška oka je měřítkem vertikálního otevření diagramu. Ideální otevírání oka by se měřilo od úrovně jedno po úroveň nuly. Šum však způsobuje zavírání oka, tudíž se musí měřit i se šumem.
6 Šířka oka	Šířka oka je měřítkem horizontálního otevření diagramu mezi body křížení oka.
7 Jitter	Jitter je odchylka přechodu od ideálního času způsobená odrazy k jiným přechodům.
8 Amplituda oka	Amplituda oka je rozdíl mezi úrovní 1 a 0.
9 Bitová rychlost	Bitová perioda je měřítko horizontálního otevírání diagramu v bodech křížení oka.



Obr. 5.2: Diagram oka a jeho analýza [2].

Postup

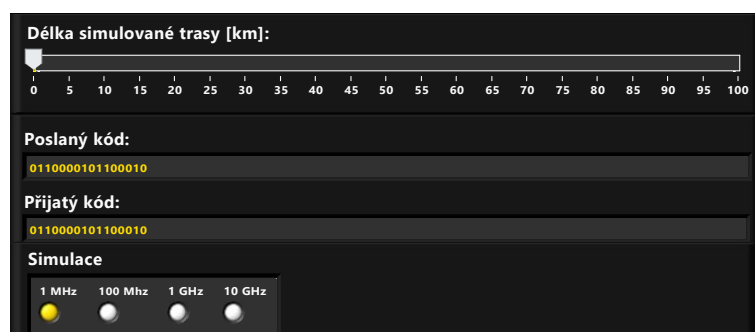
Po zapnutí programu v prostředí LabView se zobrazí 2 grafy (s pulsy a druhý s diagramem oka).

- **1** Seznamte se s připraveným grafickým rozhraním (GUI).
- **2** Zadejte vstupní slovo nebo binární kód. Binární kód pro přesné zobrazení dat zadávejte ve tvaru dělitelném 8 (8,16,24 znaků). Počet zadaných znaků pro nejlepší simulaci by měl být v rozsahu 3–5 znaků, tj. 24–40 v binárním kódu. Stiskněte tlačítko Načti data pro vygenerování vstupních dat.



Obr. 5.3: Nastavení generace dat v GUI.

- **3** Po načtení dat si vyzkoušejte nastavit různou délku trasy a poté měnit šířku pásma. Graf se bude měnit podle vašich zadaných parametrů. Výsledky lze vidět jak na grafu, tak i v textové podobě přijatých jedniček a nul. Bude provedeno celkem 12 měření, 3 měření na každé frekvenci, délka trasy bude 30, 50 a 95 km.



Obr. 5.4: Nastavení parametrů pro simulaci disperze v GUI.

- **4** Dalším krokem je analýza diagramu oka podle tabulky uvedené v úvodu 5.1. Délku trasy pro nejprůhlednější analýzu ponechte na hodnotě 0.

- 5 V posledním kroku vyhodnoťte parametry simulace, porovnejte výstupní kód a přijatý kód. Určete amplitudu a šířku diagramu oka, společně s dobou nárůstu a pádu logických hodnot. Program vypnete pomocí červeného tlačítka Stop v pravém horním rohu.

Závěr

Získané poznatky diskutujte s vyučujícím. Jaký vliv má změna vzdálenosti a změna šířky pásma na výsledný signál? Jaké hodnoty jsme schopni vyčíst z diagramu oka?

Literatura

- [1] Optické sítě - přednášky [online]. 210 stran. Brno: doc. Ing. Miloslav Filka, CSc., 2007. Dostupné z URL:
<http://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke_site_prednasky_P.pdf>.
- [2] Semiconductor and Integrated Circuit Devices [online]. 2013. Dostupné z URL:
<<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9075-D.PDF>>.

6 Závěr

Cílem práce bylo vytvoření simulačního programu pro simulaci disperze optického vlákna.

Teoretická část byla zaměřena na popis optických přenosových systémů, optická vlákna a hlavně parametry optických vláken. Bylo nutné se především podrobněji seznámit s parametrem disperze a jejími druhy, a analýzou diagramu oka. K úspěšnému vytvoření simulačního programu byla nutná bezproblémová komunikace mezi použitými nástroji. Bylo zapotřebí se seznámit s platformou Red Pitaya, a s grafickým návrhovým systémem LabView.

Při vytváření simulačního programu nastaly dva problémy mezi komunikací platformy Red Pitaya a LabView. Tudiž bylo zapotřebí upravit „drivery“ platformy Red Pitaya v programu LabView. První problém byl vyřešen změnou používané frekvence ve čtecím bloku při výpisu dat, druhý problém byl s příjmem generovaných dat do konfiguračního bloku. U tohoto problému bylo nutné změnit koncový symbol v generovaných datech z dvojtečky na středník pro správnou funkci.

Vytvořený program obsahuje čtyři hlavní části: generování dat, komunikace s platformou Red Pitaya, simulace disperze a diagram oka. Všechny části jsou spojené do jednoho bloku a pomocí grafického rozhraní lze vidět výsledky při změnách parametrů. Pro simulaci byli vybrány čtyři různé šířky vlákna (1 MHz, 100 MHz, 1 GHz a 10 GHz), a délka optické trasy 1 m až 100 km. Simulační program lze využít jako výukový program pro pochopení pojmů disperze a diagram oka. Kromě simulace, lze program využít pro měření reálné optické trasy, například při zkoumání, jaký laser by se měl na optickou trasu využít. Práce by v budoucnu mohla být rozšířena o další parametry, například útlum, nebo rozšířena o různé modulace výstupního signálu.

Literatura

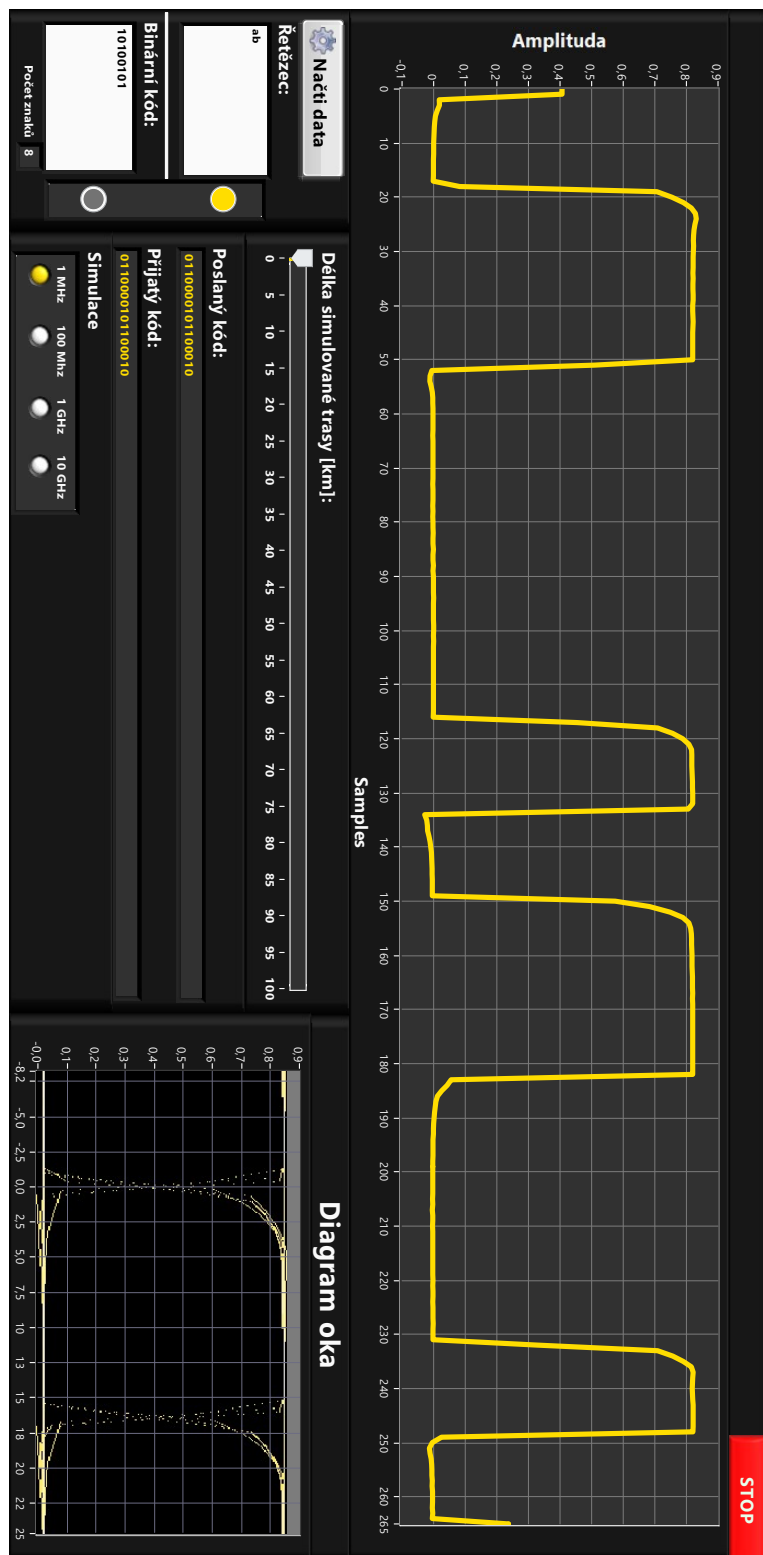
- [1] FILKA, Miloslav: *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 80-86785-14-1.
- [2] *Přenosová média* [online]. 202 stran. Brno: doc. Ing. Miloslav Filka, CSc., 2011. Dostupné z URL:
<<http://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/BPRM.pdf>>.
- [3] Optoelektronika *Elektronická učebnice ELUC* [online]. Dostupné z URL:
<<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/810>>.
- [4] BUBNÍK, L., KLAJBL, J., MAZUCH, P.: *Optoelektrotechnika*. Code Creator, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-20-5.
- [5] *Optické sítě - přednášky* [online]. 210 stran. Brno: doc. Ing. Miloslav Filka, CSc., 2007. Dostupné z URL:
<http://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke_site_prednasky_P.pdf>.
- [6] *Optické (laserové) bezdrátové spoje* [online]. Ústav radioelektroniky, VUT v Brně: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc., doc. Dr. Ing. Zdeněk Kolka, 2009. Dostupné z URL:
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Wilfert_Kolka_opticke_spoje.pdf>.
- [7] The Eye Diagram: What is it and why is it used?. Tips on measuring with oscilloscopes, multimeters, LCR meters [online]. [cit. 21.02.2019]. Dostupné z URL:
<<https://www.testandmeasurementtips.com/basics-eye-diagrams/>>.
- [8] Semiconductor and Integrated Circuit Devices [online]. Copyright © [cit. 21.02.2019]. Dostupné z URL:
<<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9075-D.PDF>>.
- [9] Eye Pattern Measurements. EDADOC one-stop PCB service, PCB design, PCB fabrication, PCBA, parts procurement [online]. Copyright © 2003 [cit. 21.02.2019]. Dostupné z URL:
<<http://www.en.edadoc.com/News/Show/100>>.
- [10] Labview National Instruments [online]. Dostupné z URL:
<<http://www.ni.com/cs-cz.html>>.

- [11] Redpitaya [online]. Copyright © 2019 StemLabs. All rights reserved. [cit. 28.03.2019]. Dostupné z URL:
<<https://www.redpitaya.com/>>.
- [12] Koheron | Prototype laser systems *Koheron / Prototype laser systems* [online]. Copyright © Koheron [cit. 02.04.2019]. Dostupné z URL:
<<https://www.koheron.com/>>.

Seznam příloh

A Přední panel	50
B Obsah přiloženého CD	51

A Přední panel



B Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD se nachází elektronická verze bakalářské práce ve formátu .pdf. Dále CD obsahuje .zip soubor s vytvořeným simulačním programem v LabView s koncovkou .vi a složkou s vytvořeným exe souborem s výsledným programem.

```
/.....kořenový adresář přiloženého CD
├─Bakalářská práce Tomáš Horský
│   └─Bakalářská práce Tomáš Horský.pdf.....elektronická verze BP
│       └─Simulační program.zip.....komprimované soubory s programem
│           └─Simulační program.vi.....simulační program v prostředí LabView
│               └─Simulační program EXE.....simulační program exe verze
│                   └─Application.aliases
│                       └─Application.exe
│                           └─Application.ini
```